

DOI: 10.29303/jrpb.v8i2.187
ISSN 2301-8119, e-ISSN 2443-1354
Tersedia online di <http://jrpb.unram.ac.id>

PENGEMBANGAN LISTRIK TENAGA BIOGAS SKALA RUMAH TANGGA UNTUK DAERAH TERPENCIL DI INDONESIA

Development of Family-Scale Biogas Electricity Generation for Isolated Areas in Indonesia

Agus Haryanto^{1,*}, Sugeng Triyono¹, Mareli Telaumbanua¹, Dwi Cahyani²

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung
Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145, Indonesia

²Program Studi Teknik Biosistem, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Jati Agung, Lampung Selatan 35365, Indonesia

Email^{*}: agus.haryanto@fp.unila.ac.id

Diterima: Juli 2020

Disetujui: September 2020

ABSTRACT

The gap in electricity availability between urban and remote areas is one of the problems that must be resolved. Some remote areas provide independent electricity using diesel generators. One potential of renewable energy that can be exploited is the utilization of biogas from livestock waste as generator fuel. This paper aims to describe the potential of household-scale biogas power generators as one of the promising solutions for electrifying remote areas or islands in Indonesia. As an established technology, biogas technology offers various benefits as a renewable energy source. Biogas technology also offers side products in the form of high-quality organic fertilizer. Household-scale biogas-fueled generators can be modified from small-sized gasoline-powered generators by adding biogas line in the carburetor. The results indicate that a household-scale biogas fueled generator is a suitable choice for the development of electricity in remote areas. The maximum benefit is obtained through an integrated system combining the activities of farming or gardening, animal husbandry, and the provision of biogas electricity. The high investment for digester construction and the price of biogas generators as well as the absence of incentives for biogas electricity are among the obstacles need to be overcome by involving stakeholders.

Keywords: *biogas; isolated villages; electricity; renewable*

ABSTRAK

Kesenjangan ketersediaan listrik antara daerah perkotaan dan terpencil merupakan salah satu masalah yang harus diselesaikan. Sebagian daerah terpencil menyediakan listrik swadaya menggunakan generator diesel. Salah satu potensi energi terbarukan yang dapat dieksploitasi adalah pemanfaatan biogas dari limbah peternakan sebagai bahan bakar genset. Penelitian ini bertujuan untuk memaparkan potensi genset tenaga biogas skala rumah tangga sebagai salah satu solusi yang menjanjikan untuk melistriki daerah atau pulau terpencil di Indonesia. Sebagai teknologi yang sudah mapan, teknologi biogas menawarkan berbagai keuntungan sebagai sumber energi terbarukan. Teknologi biogas juga menawarkan produk samping berupa pupuk

organik yang berkualitas tinggi. Genset berbahan bakar biogas skala rumah tangga dapat dimodifikasi dari genset berbahan bakar bensin berukuran kecil yaitu dengan menambahkan jalur biogas pada karburator mesin. Hasil kajian menunjukkan bahwa genset skala rumah tangga berbahan bakar biogas merupakan salah satu alternatif pilihan yang baik untuk pengembangan listrik di wilayah terpencil. Manfaat maksimal diperoleh melalui sistem terintegrasi yang memadukan kegiatan kebun/pertanian, peternakan, dan penyediaan listrik biogas. Tingginya investasi pembuatan digester dan harga genset biogas serta tidak adanya insentif bagi listrik biogas merupakan kendala yang perlu diatasi dengan melibatkan para pemangku kepentingan.

Kata kunci: biogas; desa terpencil; listrik; terbarukan

PENDAHULUAN

Listrik telah menjadi kebutuhan pokok masyarakat dan nisbah antara jumlah rumah tangga berlistrik dengan jumlah rumah tangga total, disebut rasio elektrifikasi (RE), telah menjadi ukuran kesejahteraan. Pada tahun 2019, konsumsi energi listrik per kapita Indonesia baru mencapai 1.077 kWh dengan RE 98,86% (ESDM, 2019). Angka ini lebih tinggi daripada Philipina (94,9%) dan Timor Leste (85,6%) tetapi masih lebih rendah dari Singapura, Malaysia, Thailand, Vietnam, dan Brunei yang semuanya telah mencapai RE 100% (The World Bank, 2020).

Pemerintah Indonesia telah mengidentifikasi potensi besar energi terbarukan yang dapat menjadi solusi untuk menjawab pertumbuhan permintaan listrik, sehingga mematok target rasio elektrifikasi mendekati 100% pada 2020 (Kirari *et al.*, 2018). Hingga saat ini, masih terdapat 1,14% (sekitar 3 juta) penduduk Indonesia atau 750 ribu rumah tangga yang tidak atau belum memiliki akses ke jaringan listrik. Umumnya masyarakat yang belum memperoleh listrik tinggal di daerah atau pulau-pulau terpencil. Daerah ini dicirikan dengan tidak adanya aktivitas industri, infrastruktur yang buruk, dan tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN. Masalah ini diperkuat oleh fakta bahwa Indonesia terdiri dari 16.000 lebih pulau. Jika tiap rumah tangga memerlukan daya listrik minimal 500 VA untuk memenuhi kebutuhan penerangan (sambungan listrik PLN paling rendah adalah 450 VA), dan

pembangkit listrik beroperasi dengan efisiensi 80% dari kapasitasnya, maka akan diperlukan tambahan 337,5 MW daya baru hanya untuk mencukupi kebutuhan listrik di daerah terpencil.

Sebagian masyarakat di daerah terpencil telah mengusahakan sendiri kebutuhan daya listriknya menggunakan mesin generator (genset) kecil berbahan bakar minyak (BBM). Tetapi, BBM makin langka, mahal, dan sulit diperoleh di daerah terpencil. Jika harga minyak solar Rp 9.000 per liter dan efisiensi konversi 30%, maka biaya pembangkitan listrik telah mencapai Rp 2.968 per kWh hanya untuk konsumsi bahan bakar. Harga ini jauh lebih mahal dibandingkan tarif listrik non subsidi bagi pelanggan pada Tegangan Rendah, yaitu Rp 1.467 per kWh (Kementerian ESDM, 2020).

Kebijakan Energi Nasional (KEN) mempunyai sasaran bauran energi yang optimal dengan kontribusi sumber daya energi baru dan terbarukan mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (Kementerian ESDM, 2016). Oleh karena itu, sangat penting mengembangkan sumber energi terbarukan di Indonesia yang potensinya sangat besar tetapi realisasinya masih sangat rendah. Pilihan terbaik melistriki masyarakat terpencil dan terisolir adalah pemanfaatan sumber daya energi yang tersedia secara lokal dengan menggunakan teknologi yang efisien, mapan, dan terjangkau secara ekonomi seperti: mikrohidro, biomasa, biogas, atau tenaga surya. Vaghmashi *et al.* (2014) menyatakan biogas memiliki potensi yang baik untuk menggantikan bahan bakar

minyak. Pembangkit listrik tenaga biogas skala rumah tangga memiliki beberapa keunggulan yang patut dipertimbangkan sebagai alternatif.

Pemanfaatan biogas untuk listrik bukanlah teknologi baru. Tetapi, aplikasi pembangkitan listrik skala rumah tangga menggunakan bahan bakar biogas masih terbatas (Aisyah & Herdiansyah, 2015). Sebagai contoh, hanya 7,5% dari 93 responden yang menggunakan biogas untuk listrik di Desa Mandiri Energi berbasis biogas, yaitu Desa Haurngombang, Kec. Pamulihan, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat (Hermawati, 2012).

Tujuan

Tujuan artikel ini adalah melakukan ulasan mengenai pengembangan listrik biogas sebagai salah satu alternatif pemenuhan listrik di daerah terpencil. Artikel ini disusun menjadi empat bagian, yaitu latar belakang pentingnya listrik biogas, keunggulan listrik biogas, komponen sistem listrik biogas, sistem terintegrasi, prospek dan kendala listrik biogas, dan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keunggulan Listrik Biogas

Biogas merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik yang terjadi dalam kondisi anaerobik. Dalam proses ini, bahan organik kompleks (protein, lemak, dan selulose atau pati) mengalami serangkaian dekomposisi oleh mikroorganisme yang dimulai dari hidrolisis menjadi monomer seperti asam amino, asam lemak rantai panjang, dan gula. Monomer ini akan terfermentasi membentuk asam lemak volatil (asam laktat, propionat, butirat) selama proses asidogenesis. Pada tahap asetogenesis, bakteri memakan asam lemak volatil ini untuk menghasilkan asam asetat, karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen (H_2). Akhirnya, bakteri metanogenik menghasilkan metana (CH_4) dari asam

asetat, H_2 , dan sebagian CO_2 (Abbasi *et al.*, 2012).

Komposisi utama biogas meliputi CH_4 dan CO_2 , dengan sedikit gas inert, senyawa sulfur, dan uap air. Kandungan CH_4 umumnya berkisar antara 55–70% (Tabel 1). Komposisi biogas bervariasi bergantung pada substrat (bahan baku) yang digunakan. Umumnya, hasil biogas mencapai 100–200 m^3 dari setiap ton bahan organik yang di degradasi (RISE-AT, 1998). Dalam proses ini juga dihasilkan kompos dan pupuk cair yang dapat digunakan untuk budidaya tanaman. Oleh karena itu, produksi dan penggunaan biogas memberikan manfaat sosial, ekonomi, dan lingkungan, baik bagi masyarakat secara keseluruhan maupun petani yang terlibat. Hal tersebut merupakan manfaat penting dari teknologi biogas (Al-Seadi *et al.*, 2008).

Tabel 1. Komposisi Tipikal Biogas (RISE-AT, 1998)

Komponen	Kisaran
Metana (CH_4)	55–70 % vol
Karbon dioksida (CO_2)	30–45 % vol
Hidrogen sulfida (H_2S)	200–4000 ppm vol
Nilai energi biogas	20–25 MJ/Nm ³

Kandungan CH_4 dalam biogas seperti dalam Tabel 1 mengisyaratkan bahwa biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk berbagai keperluan: masak, penerangan, dan pembangkitan listrik. Penggunaan biogas untuk menghasilkan listrik skala rumah tangga bisa menjadi salah satu solusi yang menjanjikan di daerah terpencil karena berbagai keunggulan yang ditawarkan.

Sumber energi terbarukan

Biogas adalah energi terbarukan karena dihasilkan dari biomasa. Substrat untuk proses biogas dapat dikembangkan secara lokal dan murah seperti kotoran sapi, limbah pertanian, atau tanaman energi. Biogas akan meningkatkan ketersediaan energi suatu daerah dan juga memberikan kontribusi penting dalam penyelamatan sumber daya alam dan perlindungan terhadap lingkungan. Pengembangan dan

aplikasi sistem listrik biogas yang didasarkan pada potensi sumberdaya lokal akan meningkatkan pasokan energi dan ketahanan energi daerah sehingga mengurangi ketergantungan pada BBM (Al-Seadi *et al.*, 2008).

Mengurangi emisi GRK

Penggunaan bahan bakar fosil akan mengubah karbon yang telah tersimpan jutaan tahun di dalam bumi, dan melepaskannya ke dalam atmosfer sebagai CO₂. Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat menyebabkan pemanasan global karena CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK). Pembakaran biogas juga menghasilkan CO₂ ke atmosfer, tetapi secara keseluruhan netral karena dipakai oleh tanaman melalui proses fotosintesis. Daur ulang karbon dari biogas terjadi dalam waktu yang sangat singkat. Emisi CH₄ dan N₂O (dinitrogen oksida) yang terjadi pada timbunan dan aplikasi kotoran hewan juga dapat dikurangi melalui produksi biogas. Potensi GRK CH₄ adalah 21 kali lebih tinggi dari CO₂ dan untuk N₂O 296 kali. Oleh karena itu, selain menggantikan BBM, listrik biogas juga mengurangi emisi GRK (Chynoweth *et al.*, 2001) sehingga dapat menurunkan potensi pemanasan global (Mitianiec, 2012).

Sumber pupuk organik

Digester biogas tidak hanya menghasilkan energi. Lumpur yang keluar dari digester (dinamakan digestat) merupakan pupuk yang sangat baik karena kaya nitrogen, fosfor, potasium dan unsur hara mikro. Dibandingkan dengan kompos kotoran hewan yang tidak diolah, digestat lebih homogen, memiliki nutrisi lebih tersedia, C/N rasio lebih baik, dan bau yang sudah jauh berkurang (Al-Seadi *et al.*, 2008).

Membuka lapangan pekerjaan

Produksi biogas melalui proses anaerobik memerlukan tenaga kerja untuk produksi bahan baku, pengumpulan dan transportasinya, pembuatan perkakas teknis,

konstruksi, pengoperasian dan perawatan digester biogas. Hal ini akan memberikan kontribusi terhadap pembukaan usaha baru yang memiliki potensi ekonomi signifikan, sehingga menciptakan lapangan kerja di pedesaan dan meningkatkan pendapatan (Al-Seadi *et al.*, 2008).

Modifikasi mudah

Mesin genset berbahan bakar bensin dapat dikonversi ke biogas dengan mengubah karburator sehingga bisa beroperasi menggunakan bahan bakar gas. Konversi ini mudah dilakukan dan adaptor bahan bakar gas juga mudah diperoleh di pasaran.

Beroperasi secara off-grid

Pembangkit listrik rumah tangga beroperasi secara terdesentralisasi atau *off-grid*, sehingga tidak memerlukan pembuatan jaringan distribusi yang sangat mahal. Biaya pembuatan jaringan makin tinggi seiring dengan jaraknya sehingga sering menjadi kendala utama dalam pengembangan listrik di daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik pusat (Louie, 2018).

Lebih ekonomis

Terkait dengan aspek sosial-ekonomi masyarakat pedesaan, biogas yang dihasilkan dari sumber daya terbarukan merupakan pilihan yang tepat dan dapat memainkan peranan penting dalam memenuhi kebutuhan energi dan penyelesaian masalah lingkungan (Kabir *et al.*, 2013). Berdasarkan analisis parameter secara menyeluruh, Chandra *et al.* (2012) menyimpulkan produksi biogas dari limbah pertanian lebih menguntungkan secara ekonomi dan lingkungan serta merupakan suatu cara menghasilkan energi dari biomassa secara berkelanjutan. Biogas lebih kompetitif dari sisi biaya dan efisien jika dibandingkan dengan bentuk energi biomassa lainnya seperti gas sintetis dan etanol (Chynoweth *et al.*, 2001). Ditinjau dari harga bahan bakar, penggunaan biogas untuk operasional mesin, cenderung lebih

hemat karena diperoleh secara gratis dibandingkan penggunaan dengan BBM dengan kisaran harga Rp 5.150-11.500 setiap literanya.

Komponen Sistem

Sistem pembangkit listrik biogas skala rumah tangga memerlukan komponen digester anaerobik, genset, dan beberapa komponen pendukung.

Digester Anaerobik

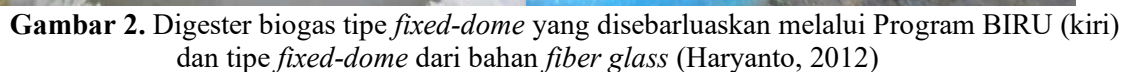
Digester adalah wadah anaerobik yang dipakai untuk mendekomposisi bahan organik dan menghasilkan biogas. Tabel 2 menyajikan perbandingan empat tipe digester yang dapat diaplikasikan di Indonesia. Dua tipe yang banyak diadopsi adalah digester tipe *fixed-dome* dan tipe plastik tubuler.

Digester fixed-dome

Digester ini terdiri dari digester (bagian bawah) berbentuk silinder dan bagian atas berbentuk kubah berfungsi sebagai *gas-holder*. Ketika produksi gas sudah dimulai, maka substrat yang menyerupai bubur (*slurry*) akan didorong ke kolam kompensasi. Tekanan gas akan terus meningkat seiring dengan peningkatan jumlah gas yang tersimpan dan setara dengan beda tinggi antara permukaan *slurry* di dalam digester dan permukaan *slurry* di dalam kolam kompensasi. Jika biogas dalam *gas-holder* tidak banyak, maka tekanan gas (terbaca pada manometer air) akan rendah. Sistem dilengkapi dengan bak pembuangan *slurry* berbentuk kotak yang berfungsi untuk menampung sementara lumpur dan untuk meningkatkan tekanan gas di dalam digester. Ukuran digester bervariasi dari 4 m³ hingga 12 m³ (Hariyanto, 2012). Diseminasi digester tipe *fixed-dome* di Indonesia difasilitasi oleh HIVOS melalui Program biogas rumah (BIRU). Gambar 1 dan 2 memperlihatkan desain dan aplikasi lapangan biogas tipe *fixed dome*.

Tabel 2. Perbandingan empat tipe digester (Warner *et al.*, 1989)

Faktor	<i>Fixed dome</i>	<i>Floating drum</i>	Plastik tubular
Penyimpanan gas	Penyimpanan gas internal hingga 20 m ³ (ukuran besar)	Penyimpanan gas internal ukuran drum (kecil)	Penyimpanan gas eksternal memakai kantung plastik
Tekanan gas	Antara 60 – 120 mbar	Hingga 20 mbar	Rendah, sekitar 2 mbar
Kemampuan kontraktor	Tinggi; tukang batu, tukang pipa	Tinggi; tukang batu, tukang pipa, tukang las	Medium; tukang pipa
Ketersediaan material	Ya	Ya	Ya
Ketahanan (<i>durability</i>)	Sangat tinggi > 20 tahun	Tinggi; drum adalah titik lemahnya	Medium; tergantung pada liner yang dipilih
Pengadukan	Otomatis oleh tekanan biogas	Pengadukan manual	Tidak mungkin; tipe <i>plug flow</i>
Ukuran	Volume digester 6 – 124 m ³	Hingga 20 m ³	Memungkinkan kombinasi
Emisi metana	Tinggi	Medium	Rendah



Digester ini biasanya dibangun dari pasangan bata-semen, dan atau beton *ferrocement*. Kini, digester *fixed-dome* dari plastik atau fiber juga tersedia di pasaran. Parameter utama dalam pemilihan material meliputi: kesesuaian teknis (stabilitas, kekedapan gas- dan cairan), biaya, ketersediaan secara lokal dan ongkos transportasi, ketersediaan tenaga kerja terlatih lokal untuk mengerjakan beberapa material bangunan khusus (Warner *et al.*, 1989). Digester ini dipasarkan dengan harga seperti diberikan pada Tabel 3.

Kapasitas (m ³)	Produksi Gas (m ³ /hari)	Input Kotoran ^{a)} (kg/hari)	Input Air (L/hari)	Jumlah Sapi (ekor)	Harga ^{b)} (Rp)
4	0,8 – 1,6	20 – 40	20 – 40	3 – 4	5.500.000
6	1,6 – 2,4	40 – 60	40 – 60	5 – 6	6.500.000
8	2,4 – 3,2	60 – 80	60 – 80	7 – 8	7.500.000
10	3,2 – 4,2	80 – 100	80 – 100	9 – 10	9.000.000
12	4,2 – 4,8	100 – 120	100 – 120	11 – 12	10.500.000

b) Tahun 2011

Kekurangan digester ini adalah bahwa tekanan gas berfluktuasi sehingga aliran gas tidak konstan. *Burner* dan perkakas sederhana lainnya tidak dapat disusun secara optimal. Jika biogas digunakan untuk perkakas yang memerlukan tekanan konstan (misalnya, mesin genset), maka diperlukan regulator tekanan atau *gas-holder* apung (Warner *et al.*, 1989).

Digester Tipe Plastik Tubuler

Digester tipe plastik tubuler (Gambar 3) awalnya dikembangkan di Amerika Latin (Bolivia, Peru, Ecuador, Colombia, dan Mexico). Digester ini menggunakan plastik PE (*polyethylene*) tubular dengan *gas holder* terpisah. Untuk keamanan, dapat dipakai dua lapis plastik dengan ketebalan masing-masing 300 mikron. Pada kedua ujungnya, plastik diikatkan melingkari pipa PVC 6"

dan mengikatnya dengan tali karet. Salah satu ujung pipa PVC 6" digunakan sebagai saluran *inlet* dan ujung lainnya sebagai *outlet*. Di dalam digester akhirnya akan tercipta keseimbangan hidraulik antara jumlah substrat yang ditambahkan dengan digestat yang keluar. Hal ini karena plastik PE sangat fleksibel dan mudah rusak, maka digester perlu dilindungi. Digester dapat diletakkan dalam parit (lubang galian) atau bak memanjang. Naungan diperlukan untuk melindungi plastik dari radiasi UV matahari. Dari segi teknis dan biaya, digester plastik tubuler adalah yang paling sederhana dan paling murah (Aisyah & Herdiansyah, 2015). Kelebihan dan kekurangan digester plastik diberikan pada Tabel 4. Digester ini direkomendasikan jika pembiayaan menjadi masalah yang substansial.



Gambar 3. Digester biogas tipe plastik *tubuler* (Foto: Agus Haryanto, 2011)

Tabel 4. Kelebihan dan kekurangan digester plastik tubuler (Warner *et al.*, 1989)

Kelebihan	Kekurangan
Dapat dibuat secara standar dengan biaya rendah sebelum instalasi	Tekanan biogas yang rendah akan memerlukan pembebanan atau pompa gas
Sesuai untuk daerah dengan air permukaan yang rendah karena dapat diinstal secara dangkal	<i>Scum</i> tidak dapat diambil selama pengoperasian digester
Mudah transportasi	Plastik memiliki umur pakai relatif singkat
Konstruksi tidak rumit	Plastik biasanya tidak tersedia secara lokal
Suhu digester tinggi di daerah beriklim hangat	Plastik rentan terhadap kerusakan mekanis
Pembersihan tidak rumit	Potensi penciptaan tenaga kerja lokal sedikit
Digester bisa bekerja dengan substrat yang sulit	Kerusakan sulit diperbaiki
Mudah pengurusan dan perawatan	Potensi swa-kelola (<i>self-help</i>) yang terbatas

Digester Tipe Floating Tank

Digester biogas tipe *floating tank* diperkenalkan di India oleh Jashu Bhaji J. Patel pada 1956 yang menamainya digester biogas Gobar (FAO, 1996). Digester ini terdiri dari digester yang terletak di bawah permukaan tanah dan sebuah *gas-holder* yang dapat dipindahkan. Digester berbentuk silinder dan *gas-holder* dari tangki atau drum yang mengapung baik secara langsung di atas bubur (*slurry*) atau mengapung pada selimut air (*water jacket*) dari *gas-holder* itu sendiri. Biogas dikumpulkan di dalam tangki gas yang akan naik atau turun, bergantung pada jumlah gas yang disimpan. Drum gas dipertahankan untuk tidak

terjungkir oleh sebuah kerangka (*guide frame*). Jika biogas diproduksi, drum bergerak ke atas dan ketika biogas digunakan, drum bergerak ke bawah. Digester biogas Gobar ditinggalkan setelah masuknya digester model *fixed-dome* dari China, karena digester Gobar memerlukan investasi yang tinggi plus biaya perawatan akibat desain yang kurang sempurna.

Penulis menyederhanakan desain digester *floating tank* dengan digester berupa sumur plester sedalam 2 m dan pemanfaatan tangki air sebagai gas holder (Gambar 4). Drum dilengkapi tali dari kawat baja atau tambang plastik untuk mencegah agar drum tidak akan terjungkir.



Gambar 4. Digester biogas tipe floating drum kerjasama Tim Penulis dengan Gapoktan Sido Rukun, Desa Rejomulyo, Lampung Selatan (Foto: Agus Haryanto, 2018)

Genset Biogas

Pembangkitan listrik tenaga biogas skala rumah tangga dapat dilakukan dengan mesin genset kecil. Biogas dapat dicampur dengan solar untuk mesin diesel atau dipakai sepenuhnya (100% biogas) untuk mesin bensin. Daya yang dihasilkan dapat digunakan untuk menjalankan berbagai perkakas seperti refrigerator, kompresor, pembangkit daya listrik, dan pompa irigasi. Kini, generator kecil (kapasitas sekitar 1 kW) dengan bahan bakar bensin makin banyak digunakan di wilayah pinggiran kota oleh kios kecil, rumah tangga, atau

perkantoran untuk mengatasi listrik padam. Generator ini bisa dioperasikan sepenuhnya menggunakan biogas untuk mengatasi kelangkaan listrik di daerah terpencil. Tipayawong *et al.* (2010) melaporkan bahwa mesin dapat bekerja secara memuaskan dengan bahan bakar biogas tanpa modifikasi dan tidak terdapat masalah pada pengoperasian yang panjang. Genset berkapasitas 1,5 kW dilaporkan bekerja menggunakan 100% biogas. Meskipun konsumsi bahan bakar spesifik menggunakan biogas lebih tinggi, tetapi efisiensi puncak sebanding dengan mesin

yang menggunakan bensin (Ehsan & Naznin, 2005). Mesin bensin dapat dikonversi untuk beroperasi menggunakan biogas. Konversi ini dilakukan dengan merubah karburator sehingga dapat bekerja dengan bahan bakar gas. Jawurek *et al.* (1987) menyatakan bahwa konversi motor bensin ke motor gas merupakan pekerjaan sederhana. Para petani di Wilayah Sragi Lampung Selatan bahkan bisa mengerjakan sendiri konversi motor bensin untuk beroperasi menggunakan gas (LPG) untuk keperluan pompa irigasi (Haryanto *et al.*, 2017a). Dari hasil kajiannya, Surata *et al.*, (2014) juga melaporkan konversi sederhana motor bensin 4-tak silinder tunggal untuk menggerakkan generator listrik menggunakan bahan bakar biogas tanpa merubah rasio kompresi dari mesin orisinal. Mesin dilaporkan bekerja secara stabil dan dapat membangkitkan listrik dengan biogas 100% tanpa campuran. Perlengkapan atau kit konversi karburator ke bahan bakar gas kini bahkan sudah tersedia secara komersial.

Komponen Pendukung

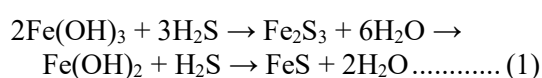
Komponen pendukung yang penting adalah unit desulfurisasi untuk menurunkan kadar hidrogen sulfida (H_2S), unit *water trap* untuk mengambil uap air, dan unit CO_2 *remover* untuk mengurangi kadar CO_2 .

Desulfuriser

Biogas mengandung hidrogen sulfida atau H_2S (Tabel 1). Meskipun sedikit, H_2S sangat membahayakan komponen dalam mesin seperti perapat (*seal*) dan katup. Senyawa ini sangat korosif terhadap bagian-bagian logam di dalam mesin. Selain itu, pembakaran biogas yang mengandung H_2S akan menghasilkan sulfur dioksida (SO_2) yang beracun. Jika SO_2 bereaksi dengan uap air, terbentuk asam sulfat (H_2SO_4) yang menyebabkan korosi di dalam ruang bakar mesin dan pipa gas buang (knalpot). Senyawa SO_2 juga larut di dalam oli mesin yang mengakibatkan oli menjadi asam, kehilangan daya lumas, dan mempersingkat masa penggantian oli (Cherosky, 2012; Muche & Zimmermann, 1985). Genset dari

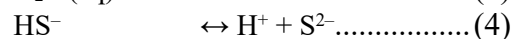
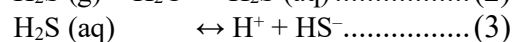
jenis mesin bakar-dalam mensyaratkan kandungan H_2S dalam biogas kurang dari 100 ppm (McKinsey-Zicari, 2003).

H_2S dapat dihilangkan dari biogas dengan cara menyaring biogas tersebut menggunakan tanah alami atau bijih besi (ore) atau bahan besi oksida. Bahan *ferrous* ini dimasukkan ke dalam kontainer kedap udara yang terbuat dari baja atau plastik dengan tinggi tumpukan bahan *ferrous* 20 – 30 cm. Biogas dilewatkan dari bawah dan keluar di bagian atas kontainer. Biogas akan bebas dari H_2S melalui Persamaan reaksi 1.

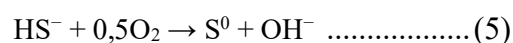


Proses ini akan berhenti setelah sebagian besar besi muncul sebagai sulfida (FeS dan Fe_2S_3). Tetapi, sulfida besi ini dapat diregenerasi menggunakan oksigen atmosfer. Proses regenerasi ini dapat diulangi sampai 10 kali (Muche & Zimmermann, 1985), sebelum akhirnya absorbent dibuang karena terlapisi dengan sulfur elementer dan pori-porinya menjadi tersumbat.

Kobayashi *et al.* (2012) mencatat metode desulfurisasi dapat dilakukan secara biologi seperti penggunaan *bio-filter* dan *bio-scrubber*. Desulfurisasi H_2S terjadi secara fisik melalui absorpsi oleh air atau secara biologi oleh mikroba. Proses absorpsi berlangsung melalui disosiasi (Horikawa *et al.*, 2004) sesuai Persamaan reaksi 2, 3, dan 4.



Proses biologi dimulai dengan disosiasi H_2S yang menghasilkan HS^- . Dalam kondisi oksigen terbatas, bakteri memfasilitasi reaksi redoks menghasilkan S^0 (Abatzoglou, 2009) sesuai Persamaan reaksi 5.

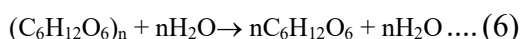


Su *et al.* (2013) melaporkan efisiensi pembuangan H_2S mencapai rata-rata 93% melalui desulfurisasi bio-filter. Penggunaan kompos kotoran sapi, McKinsey-Zicari (2003) menurunkan H_2S dari biogas dengan efisiensi mencapai 80%. Haryanto *et al.* (2017b) melaporkan penggunaan *bio-scrubber* dari kompos lokal dan memperoleh efisiensi 98% untuk biogas yang dihasilkan dari limbah cair kelapa sawit.

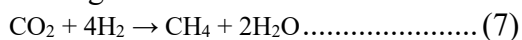
Water Trap

Proses penguraian anaerobik terhadap bahan organik juga menghasilkan uap air. Oleh karena itu, biogas biasanya jenuh dengan uap air, yaitu memiliki kelembaban relatif 100%. Air dihasilkan selama proses hidrolisis dan metanogenesis yang dapat dilihat dari Persamaan reaksi 6 dan 7.

Hidrolisis:



Metanogenesis:



Adanya uap air di dalam biogas akan mengakibatkan biogas memiliki nilai energi yang rendah. Selain itu, uap air dapat menyebabkan korosi pada permukaan logam jika bereaksi dengan H_2S . Oleh karena itu, biogas harus dikeringkan. Pengeringan biogas bisa terjadi selama pendinginan di sepanjang pipa (Scott & Tura, 2020). Tergantung pada panjang pipa yang menghubungkan antara digester dengan mesin, sebagian uap air mengalami kondensasi. Uap air yang telah mengalami kondensasi dapat dikumpulkan di dalam sebuah *water trap* berupa tabung ekspansi. Pipa yang mengalirkan biogas dilewatkan melalui tabung ekspansi sehingga uap air akan mengembun. Uap air yang mengembun akan tertampung di dalam tabung ekspansi dan dapat dibuang secara berkala.

Sistem Terintegrasi

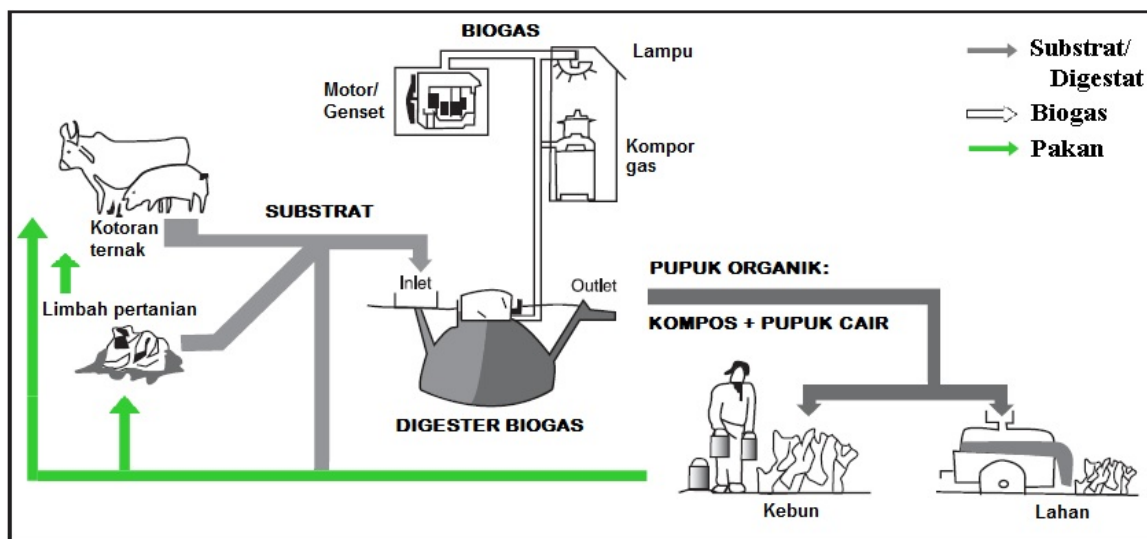
Daerah pedesaan dan kegiatan agroindustri merupakan sumber biomasa terbesar. Di sini, jumlah limbah organik (limbah panen, kotoran hewan, efluen agroindustri, dan sebagainya) melimpah dan menjadi justifikasi bagi implementasi sistem konversi energi skala kecil yang terdesentralisasi untuk memenuhi kebutuhan energi lokal. Integrasi kegiatan peternakan, pertanian, dan penyediaan energi akan menghasilkan sistem ideal tanpa limbah. Menurut Gupta *et al.* (2012), sistem pertanian terintegrasi memiliki posisi spesial karena produk samping (*by-product*) dari satu sistem menjadi *input* bagi sistem lainnya. Gambar 5 menunjukkan sistem produksi dan pemanfaatan biogas yang terintegrasi dengan aktivitas pertanian dan peternakan. Modifikasi sistem diberikan oleh garis hijau dengan penjelasan pada budidaya tanaman akan menghasilkan limbah, seperti jerami, tebon jagung, atau biomassa lainnya yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pakan bagi ternak. Pakan juga dapat diperoleh langsung dari tanaman yang sengaja ditanam untuk pakan, misalnya rumput gajah. Selanjutnya, kotoran ternak merupakan substrat yang baik bagi digester anaerobik untuk menghasilkan biogas yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Tambahan substrat organik juga dapat diperoleh dari limbah pertanian atau agroindustri. Digester biogas juga akan menghasilkan produk samping digestat yang dapat dimanfaatkan sebagai kompos yang berkualitas untuk proses budidaya tanaman. Dalam sistem terintegrasi, semua limbah ternak dapat diproses *in-situ* untuk menghasilkan biogas sebagai sumber energi alternatif. Dari sudut pandang lingkungan, sistem ini sangat baik dan dapat menjaga kelestarian sistem produksi.

Aktivitas peternakan warga masyarakat memiliki beberapa karakteristik yang membuatnya sesuai bagi implementasi sistem ini. Di satu sisi, terdapat limbah bahan organik dalam jumlah yang melimpah (terutama kotoran hewan dan sisa pakan). Di

sisi lain, masyarakat memerlukan sumber energi untuk penerangan dan aktivitas lainnya. Wilayah dengan aktivitas peternakan sapi perah, merupakan lokasi yang sangat menguntungkan bagi integrasi ini karena susu sapi dapat didinginkan secara *in-situ* sehingga dapat memperpanjang umur simpan, mempertahankan cita rasa (organoleptik), dan mempertahankan nutrisi dan kualitasnya (Fiorelli & Diaz, 2007).

Hasil penelitian Soelaeman & Maswar (2014) mengenai integrasi ternak-tanaman-biogas menunjukkan bahwa seekor sapi

menghasilkan kotoran dan urine sebanyak 11,25 kg/hari dan produksi biogas dari digester berukuran 9 m³ mencapai 3 m³/hari yang cukup untuk bahan bakar memasak dan penerangan sehari-hari. Produk samping dari digester biogas adalah lumpur 8 kg/hari dan 127 liter/hari pupuk cair. Pemanfaatan produk samping (lumpur kering) sebagai pupuk pada tanaman jagung hibrida ditambah pupuk NPK sebanyak 50% dari dosis rekomendasi memberikan hasil tertinggi sebesar 4,45 t/ha dengan keuntungan Rp 3.466.000 per ha dan rasio BC 1,5.



Gambar 5. Integrasi sistem tanaman-ternak-biogas (Warner *et al.*, 1989, dimodifikasi).

Prospek dan kendala

Sesungguhnya teknologi biogas telah memberikan kontribusi yang penting bagi penyediaan energi di berbagai negara, baik negara maju maupun negara berkembang (Abraham *et al.*, 2007). Beberapa negara seperti Jerman (Scheftelowitz and Thrän, 2016), China (Chen *et al.*, 2014), India (Schmidt & Dabur, 2014), Nepal (Barnhart (2014), Bangladesh (Khan *et al.*, 2014), dan Vietnam (An *et al.*, 1997) telah menikmati kesuksesan dari energi biogas. Pada akhir tahun 2010, China telah menginstal 41,2 juta digester biogas rumah tangga di daerah pedesaan dengan produksi biogas tahunan mencapai 15,5 miliar meter kubik (Feng *et al.*, 2014). Kementerian Energi Baru dan Terbarukan India, telah berhasil menginstal 4,75 juta digester biogas di seluruh wilayah

pada tahun 2014 (MOSPI, 2015). Barnhart (2014) melaporkan bahwa Nepal telah menginstal sekitar 250.000 unit digester biogas yang dapat menghemat pemakaian kayu bakar sebesar 239.386 ton per tahun dan 3,83 juta liter minyak tanah. Jumlah keseluruhan digester biogas yang telah diinstal di Vietnam mencapai sekitar 200.000 unit (Nguyen, 2011). Bangladesh telah menginstal lebih dari 40.000 unit digester biogas domestik menggunakan substrat kotoran sapi dan kotoran unggas (Khan *et al.*, 2014). Melalui dukungan dari SNV, digester biogas domestik juga berkembang di Afrika. Pada tahun 2009, total digester biogas yang telah diinstal Afrika mencapai 53.617 (Ghimire, 2013).

Adopsi teknologi digester biogas rumah tangga di Indonesia berlangsung

lambat dibandingkan negara-negara tersebut. Sejak tahun 2009, Indonesia telah menerima dukungan dari pemerintah negeri Belanda untuk mempromosikan digester biogas domestik melalui suatu program yang dinamakan Program Biogas Rumah Tangga yang lebih populer dengan nama BIRU (Biogas Rumah). Jumlah digester biogas yang ditargetkan untuk diinstal melalui program ini adalah 8.000 unit pada fase pertama dan 26.000 unit digester pada fase kedua (BIRU, 2015). Hingga Maret 2015, jumlah digester biogas yang telah diinstal mencapai 14.478 yang tersebar di sembilan provinsi (Vorley *et al.*, 2015).

Indonesia memiliki potensi bahan organik yang melimpah yang berasal dari limbah pertanian, industri rumah tangga, agroindustri, peternakan, maupun tanaman yang sengaja ditanam untuk energi. Selain itu, Indonesia telah memiliki pengalaman panjang dalam pengembangan biogas rumah tangga yang dimulai sejak 1970-an. Oleh karena itu, prospek pengembangan listrik tenaga biogas skala rumah tangga terbuka lebar. Hal ini selaras dengan target pemerintah untuk menaikkan rasio elektrifikasi mendekati 100% pada tahun 2020 (Kirari *et al.*, 2018) dan penurunan emisi GRK sebesar 29%, maka peluang ini tidak boleh dilewatkan begitu saja.

Salah satu faktor yang secara tidak disadari menjadi kendala pengembangan teknologi biogas rumah tangga adalah penggunaan biogas itu sendiri untuk kepentingan memasak. Sejak tahun 2007, Indonesia telah melakukan program konversi minyak tanah ke LPG. Kebijakan ini dilakukan dengan pendistribusian kompor dan tabung LPG @3kg kepada masyarakat hingga ke wilayah perdesaan. Pemanfaatan biogas rumah tangga terutama adalah untuk menggantikan LPG @3kg yang merupakan bahan bakar murah karena subsidi. Hal ini mengakibatkan keuntungan ekonomi biogas kurang menarik. Haryanto *et al.* (2017c) menyimpulkan bahwa keuntungan ekonomi biogas sebagai bahan bakar memasak hanya setara dengan 3 botol LPG @3kg per bulan atau sekitar Rp 60.000

per bulan. Jika diperhitungkan bahwa digester harus diisi setiap hari, maka keuntungan sebesar ini kurang menarik. Oleh karena itu, diversifikasi pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar pembangkit listrik rumah tangga akan lebih menarik masyarakat untuk berinvestasi. Selain itu, bahan bakar biomasa masih tersedia melimpah di daerah terpencil.

Faktor lain yang perlu diperhitungkan bagi keberhasilan pengembangan listrik biogas rumah tangga, antara lain:

- a. Lemahnya koordinasi di antara pihak-pihak yang memiliki program biogas.
- b. Tingginya investasi pembuatan digester dan harga genset biogas.
- c. Belum adanya insentif yang diberikan oleh pemerintah bagi masyarakat yang terlibat dalam pengembangan dan pemanfaatan biogas.

Sulitnya pendanaan bagi masyarakat perlu diatasi dengan melibatkan berbagai pihak, seperti swasta melalui program CSR, lembaga pemerintah dan perguruan tinggi melalui program pengabdian masyarakat.

KESIMPULAN

Genset tenaga biogas skala rumah tangga merupakan teknologi yang menjanjikan untuk menyuplai listrik bagi daerah terpencil dan terisolir di Indonesia. Komponen sistem pembangkit listrik tenaga biogas skala kecil terdiri dari digester anaerobik untuk menghasilkan biogas, mesin genset yang telah dimodifikasi untuk dapat menggunakan bahan bakar biogas, unit *desulfuriser* untuk menurunkan kadar H_2S yang bersifat korosif bagi genset dan unit *water trap* untuk menurunkan kadar air biogas. Untuk memberikan nilai tambah yang maksimal, perlu diterapkan sistem terintegrasi yang memadukan kegiatan kebun/pertanian, peternakan, dan penyediaan listrik biogas. Tingginya investasi pembuatan digester dan harga genset biogas serta tidak adanya insentif bagi listrik biogas merupakan kendala yang perlu diatasi dengan melibatkan para pemangku kepentingan.

DAFTAR REFERENSI

- Abatzoglou, N. (2009). A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproduct, Biorefinery*, 3: 42–71.
- Abbasi, T., Tauseef, S.M., Abbasi, S.A. (2012). *Biogas Energy*. Springer, New York: 1–10.
- Abraham, E.R., Ramachandran, S., Ramalingam, V. (2007). Biogas: Can it be an important source of energy? *Environmental Science and Pollution Research*, 14(1): 67–71.
- Aisyah, I. U., Herdiansyah, S. (2015). Strategi pemberdayaan masyarakat dalam pelaksanaan program Desa Mandiri Energi. *Share: Social Work Journal*, 9(3): 130–141.
- Al-Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark.
- An, B.X., Preston, T.R., Dolberg, F. (1997). The introduction of low-cost polyethylene tube biodigesters on small scale farms in vietnam. *Livestock Research for Rural Development*, 11(1). <http://www.lrrd.org/lrrd9/2/an92.htm> (Accessed July 10, 2015).
- Barnhart, S. (2014). From household decisions to global networks: biogas and the allure of carbon trading in Nepal. *The Professional Geographer*, 66(3): 345–353.
- BIRU (Biogas Rumah). (2015). *Annual Report Indonesia Domestic Biogas Programme January – December 2014*.
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: a review in context to second generation of biofuel production. *Renewable Sustainable Energy Review*, 16: 1462–1476.
- Chen, Y., Hua, W., Feng, Y., & Sweeney, S. (2014). Status and prospects of rural biogas development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 679–685.
- Cherosky, P.B. (2012). Anaerobic digestion of yard waste and biogas purification by removal of hydrogen sulfide. *Master Thesis*. Graduate Program in Food, Agricultural and Biological Engineering, Ohio State University.
- Chynoweth, D.P., Owens, J.M., Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 22(3): 1–8.
- Ehsan, M., Naznin, N. (2005). Performance of a biogas run petrol engine for small scale power generation. *Journal of Energy & Environment*, 4: 1–9.
- ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral). (2019). *Bahan Media Gathering Direk-torat Pembinaan Program Ketenagalistrikan*. www.gatrik.esdm.go.id (Diakses 1 Juni 2020).
- FAO (Food and Agriculture Organization). (1996). *Biogas Technology: A Training Manual for Extension*. Consolidated Management Services Nepal (P) Ltd., Kathmandu, Nepal.
- Feng, Y., Guo, Y., Yang, Y., Qin, X., & Song, Z. (2014). Household biogas development in rural China: On policy support and other macro sustainable conditions. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 16: 679–685.
- Fiorelli, F.A.S. and Diaz, G.O. (2007). Anaerobic digestion as centre of dairy livestock and agriculture integration: basis for medium-scale CDM projects development. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, 6(02): 8–13.
- Ghimire, P.C. (2013). SNV supported domestic biogas programmes in Asia and Africa. *Renewable Energy*, 49: 90–94.
- Gupta, V., Rai, P.K., Risam, K.S. (2012). Integrated crop-livestock farming systems: A strategy for resource conservation and environmental sustainability. *Indian Research Journal of Extension Education*, II (Special Issue): 49–54.
- Hariyanto. (2012). *Model Pengembangan Energi Alternatif Biogas di KPSP Setia Kawan*. Workshop Koordinasi Program Biogas Rumah (BIRU), Lampung, 23 Oktober 2012.
- Haryanto, A., Suharyadi, Lanya, B. (2017a). Pemanfaatan air tanah dangkal untuk irigasi padi menggunakan pompa berbahan bakar LPG. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 5(3): 219–226.
- Haryanto, A., Marotin, F., Triyono, S., Hasanudin, U. (2017b). Developing a family-size biogas-fueled electricity generating system. *IJRED*, 6(2): 111–118.
- Haryanto, A., Cahyani, D., Triyono, S., Murdapa, F., Haryono, D. (2017c). Economic benefit and greenhouse gas emission reduction potential of a family-scale cowdung anaerobic biogas digester. *IJRED*, 6(1): 29–36.
- Hermawati, N. (2012). Analisis Dampak Ekonomi, Sosial dan Lingkungan dari Pemanfaatan Limbah Ternak Sapi Perah: Studi Kasus di Desa Haurngombong, Kecamatan Pamulihan, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat. *Skripsi*. Departemen Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan, Fakultas Ekonomi dan Manajemen, Institut Pertanian Bogor.
- Horikawa, M.S., Rossi, F., Gimenes, M.L., Costa, C.M.M., da Silva, M.G.C. (2004). Chemical absorption of H₂S for biogas purification. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21(03): 415–422.
- Jawurek, H.H., Lane, N.W., Rallis, C.J. (1987). Biogas/petrol dual fuelling of SI engine for rural third world use. *Biomass*, 13(2): 87–103.
- Kabir, H., Yegbemey, R.N., Bauer, S. (2013). Factors determinant of biogas adoption in Bangladesh. *Renewable Sustainable Energy Review*, 28: 881–889.
- Kementerian ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral). (2016). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2016 s.d. 2025*. Jakarta.
- Kementerian ESDM. (2020). Tarif Tenaga Listrik Periode Juli-September 2020 Tidak Naik. Siaran Pers Nomor: 194.Pers/04/ SJI/2020, (3 Juni 2020).
- Khan, U.K., Mainali, B., Martin, A., & Silveira, S. (2014). Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7: 68–78.
- Kirari J.K., Adel, M., Andria, V., Lakaseru, B.O. (2018) *Supporting Indonesia's Renewable Energy Development in*

- Remote and Rural Areas through Innovative Funding*. Jakarta.
- Kobayashi, T., Li, Y-Y., Kubota, K., Harada, H., Maeda, T., Yu, H-Q. (2012). Characterization of sulfide-oxidizing microbial mats developed inside a full-scale anaerobic digester employing biological desulfurization. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93: 847–857.
- Louie, H. (2018). Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries. Springer International Publishing AG, Switzerland: 53–82.
- McKinsey-Zicari, S. (2003). Removal of hydrogen sulphide using cow manure compost. Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University (*Master Thesis*).
- Menteri ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral). (2014), Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 03/2014 tentang Petunjuk Teknis Penggunaan Dana Alokasi Khusus Bidang Energi Perdesaan Tahun Anggaran 2014.
- Mitianiec, W. (2012). Factors determining ignition and efficient combustion in modern engines operating on gaseous fuels. *Internal Combustion Engines* (Lejda, K. and Woś, P., editors). InTech, Janeza Trdine 9, Rijeka, Croatia: 3–34.
- MOSPI (Ministry of Statistics and Programme Implementation). (2015). *Energy Statistics 2015*. Central Statistics Office, Government of India. New Delhi: 12–20.
- Muche, H. and Zimmermann, H. (1985). *The Purification of Biogas*. Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Nguyen, V. C. N. (2011). Small-scale anaerobic digesters in Vietnam – Development and challenges. *Journal of Vietnamese Environment*, 1(1): 12–18.
- RISE-AT (Regional Information Service Centre for South East Asia on Appropriate Technology). (1998). Review of current status of anaerobic digestion technology for treatment of municipal solid waste. (Accessed from <http://www.ist.cmu.ac.th/riseat/documents/adreview.pdf>).
- Scheftelowitz, M., Thrän, D., (2016). Unlocking the energy potential of manure – An assessment of the biogas production potential at the farm level in Germany. *Agriculture*, 6: 1–20.
- Schmidt, T. S., Dabur, S. (2014). Explaining the diffusion of biogas in India: a new functional approach considering national borders and technology transfer. *Environmental Economics and Policy Studies*, 16: 171–199.
- Scott, S., Tura, F. (2020). Six reasons to dry biogas to a low dewpoint before combustion in a CHP engine. Diakses dari: https://www.parker.com/literature/United%20Kingdom/PAR6841_Whitepaper_v3.pdf (29 Juli 2020).
- Soelaeman, Y., Maswar. (2014). Integration of crop-livestock-biogas and the effect of dried sludge manure on the growth and yield of maize on ultisol soil. *Agrivita*, 36(2): 160–168.
- Su, J-J., Chang, Y-C., Chen, Y-J., Chang, K-C., Lee, S-Y. (2013) Hydrogen sulfide removal from livestock biogas by a farm-scale bio-filter desulfurization system. *Water Science and Technology*, 67(6): 1288–1293.

- Surata, I.W., Nindhia, T.G.T., Atmika, I.K.A., Negara, D.N.K.P., Putra, I.W.E.P. (2014). Simple conversion method from gasoline to biogas fueled small engine to powered electric generator. *Energy Procedia*, 52: 626–632.
- The World Bank. (2020). World Development Indicators. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=EG.ELC.A.CCS.ZS&country=VNM#> (23 Juli 2020).
- Tippayawong, N., Promwungkwa, A., Rerkkriangkrai, P. (2010). Durability of a small agricultural engine on biogas/diesel dual fuel operation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions B*, 34(B2): 167–177.
- Vaghmashi, J.D., Shah, D.R., Gosai, D.C. (2014). An experimental study of petrol engine using compressed biogas as a fuel. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2(04): 121–124.
- Vorley, B., Porras, I., Amrein, A. (2015). *The Indonesia Domestic Biogas Programme: Can Carbon Financing Promote Sustainable Agriculture?* International Institute for Environment and Development and Hivos, London: 10.
- Warner, U., Stöhr, U., Hees, N. (1989). *Biogas plants in animal husbandry*. GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Eschborn I, Federal Republic of Germany: 153 hal.